

11. Маслиев В. Г. Исследование динамических процессов при движении железнодорожных экипажей // Вестник Вост.-укр. гос. ун-та. Сер. Машиностроение. – Луганськ: ВУГУ, 1996. – С.176-178.
12. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Наука, 1968. – 691 с.
13. Филиппов А.П. Колебания деформируемых систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 734 с.
14. Донелл Л.Г. Балки, пластины и оболочки: Пер. с англ. – М.: Наука, 1982. – 568 с.
15. Пановко Я.Г., Губанова И.Г. Устойчивость и колебания упругих систем. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
16. Тимошенко С.П., Гудьер Д.Ж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.

*Отримано 22.05.2012*

УДК 629.4.083 : 629.45

А.Н.КУЗНЕЦОВ, А.И.РУБАНЕНКО, кандидаты техн. наук  
*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

### **ОТДАЛЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР ВАГОНОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА**

Освещаются вопросы отдаленного контроля дефектов, возникающих на поверхности катания колесных пар подвижного состава электрического транспорта в период эксплуатации.

Висвітлюються питання віддаленого контролю дефектів, що виникають на поверхні катання колісних пар рухомого складу електричного транспорту в період експлуатації.

In the article the issues of distant diagnostics of defects arising in wheel pairs on surface of a rolling stock of railway transport within the operation period are elucidated.

*Ключевые слова:* колесная пара, короткие неровности, ползун, динамические нагрузки, звуковые волны, звуковое давление, уравнения гидродинамики, линейная акустика, возмущения давления, плотности, колебательная скорость, потенциал скорости, градиент акустического давления, приемник градиента давления.

В условиях возрастания скоростей движения подвижного состава электрического транспорта, повышения требований к качеству и безопасности перевозок актуальной является задача оперативного контроля технического состояния колесных пар вагонов в движении.

В процессе эксплуатации колесная пара подвергается воздействию статических и динамических нагрузок, в результате которых возникают многочисленные дефекты, ухудшается геометрия колеса, прочностные качества материала и состояние поверхности катания, растут напряжения, снижаются плавность хода и уровень безопасности движения. Изучение и диагностирование дефектов колесных пар, возникающих в процессе срока службы, должны помочь предупредить их появление и способствовать повышению эффективности и качества перевозочного процесса.

Неровности поверхности катания колес можно разделить [1] на длинные, например, неравномерный прокат, и короткие – ползун, выщербина, навар и т.д. Движение юзом приводит к истиранию заблокированных колес в месте их соприкосновения с рельсом и появлению на бандаже колеса плоского участка – ползуна (рис.1), представляющего собой несимметричность колес рельсовых транспортных средств относительно оси вращения, для которого допустимыми являются следующие значения [1, 2]: до 1 мм – скорость установленная; 1...2 мм – скорость до 100 км/ч; 2...6 мм – скорость до 15 км/ч, ехать до ближайшей станции с заклиненной колесной парой.

На рис.2 показана идеализированная расчетная схема ползуна длиной  $l$  и глубиной  $d$  для колеса радиусом  $r$ .



Рис. 1 – Ползун на поверхности катания колеса колесной пары

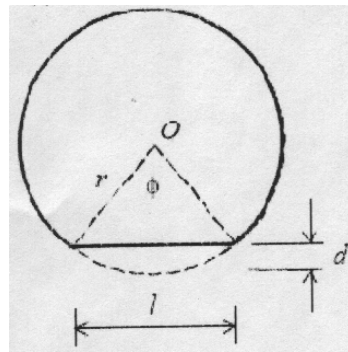


Рис.2 – Идеализованная расчетная схема ползуна

Исследования [3-5] такого дефекта колесной пары вагона подвижного состава как ползун подтвердили динамический характер воздействия его на рельсы, который при неблагоприятных условиях может привести к разрушению колеса и верхнего строения пути, и как следствие, к сходу вагона с пути, что недопустимо. Поэтому важно предупредить аварию и диагностировать дефект еще на ранней стадии закатывания.

При качении колеса колесной пары, имеющего ползун на поверхности катания, возникают динамические (ударные) нагрузки, которые инициируют колебания неподрессоренных частей вагона (колесных пар) и элементов колеи и могут быть обнаружены контактными (вибрационными) методами контроля. Колеблющиеся поверхности излучают звуковые волны, которые создают суммарное звуковое давление  $p$  и могут быть обнаружены бесконтактными (акустическими) методами контроля. Доминирующей поверхностью в процессе шумоизлучения является

колесный диск [6, 7]. Полная система уравнений гидродинамики позволяет изучать любые волны. Здесь уравнение Эйлера – уравнение движения частиц под действием сил упругости среды

$$\rho \, dv/dt + V \, p = 0, \quad (1)$$

где  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность;  $v$  – скорость частицы;  $V$  – плотность сторонней объемной скорости (она дает дополнительный объем, поступающий за единицу времени в единичный объем).

Если помимо сил давления на среду действуют сторонние силы, распределенные с плотностью  $f$  на единицу объема, то уравнение (1) примет вид:

$$\rho \, dv/dt + V \, p = f. \quad (2)$$

Уравнения движения среды (1) и (2) – это нелинейные векторные уравнения первого порядка относительно характеристик среды  $p, \rho, v$ . Так как скорость частиц зависит и от времени, и от координат, то ее производную по времени следует брать с учетом того, что координаты частицы сами зависят от времени. Ускорение выражается через частные производные скорости по времени и по координатам следующим образом:

$$dv/dt = \partial v / \partial t + v_x \, \partial v / \partial x + v_y \, \partial v / \partial y + v_z \, \partial v / \partial z = \partial v / \partial t + (vV)v. \quad (3)$$

Первый член справа (так называемое локальное ускорение) – производная скорости по времени, явно входящему; эта часть ускорения характеризует изменение скорости в данном месте пространства. При установившемся течении среды (при равномерном протекании жидкости) эта производная равна нулю. Остальные члены образуют так называемое конвективное ускорение, обусловленное переходом частицы из места с одной скоростью в место с другой скоростью. С учетом уравнения (3), можно переписать уравнение Эйлера в виде:

$$\rho \partial v / \partial t + \rho (vV)v + Vp = 0. \quad (4)$$

Уравнение (5) неразрывности среды

$$\partial \rho / \partial t + \text{div}(\rho v) = 0. \quad (5)$$

скалярно и, как и уравнение Эйлера (4), нелинейно относительно характеристик среды.

Название «уравнение неразрывности среды» связано с тем, что это уравнение справедливо, только если в среде не образуется разрывов (как, например, разрывы при кавитации).

Встречаются случаи движения среды, удовлетворяющие вместо уравнения неразрывности (5) уравнению вида:

$$\partial \rho / \partial t + \text{div}(\rho v) = \rho V. \quad (6)$$

Это уравнение можно также интерпретировать как уравнение неразрывности, но примененное к среде, куда поступает «из ниоткуда»

дополнительное «стороннее» количество среды. Величину  $V$  называют плотностью сторонней объемной скорости: она дает дополнительный объем, поступающий за единицу времени в единичный объем.

Уравнение состояния среды связывает давление, плотность (или сжатие) и температуру среды  $T$  и не имеет какого-либо стандартного вида для всех веществ, наподобие уравнения Эйлера или уравнения неразрывности. Оно также нелинейно и в самом общем виде может быть представлено следующим образом:

$$\Phi(p, \rho, T) = 0. \quad (7)$$

Если при данном движении среды плотность  $\rho$  однозначно связана с давлением  $p$ , то уравнение состояния можно записать в виде:

$$\rho = \rho(p) \quad (8)$$

или

$$s = s(p). \quad (9)$$

Система уравнений (4), (5) и (7) или (8), (9) является полной системой уравнений гидродинамики.

Для линейной акустики уравнения для звуковых волн малой амплитуды в идеальной среде можно получить, воспользовавшись уравнениями гидродинамики: уравнением Эйлера (4) и уравнением неразрывности среды (5) (оно скалярно). Параметры среды  $p$  и  $\rho$  можно представить в виде:

$$p = p_0 + p'; \quad (10)$$

$$\rho = \rho_0 + \rho', \quad (11)$$

где  $p_0, \rho_0$  — постоянные равновесные давление и плотность;  $p', \rho'$  — их изменения в звуковой волне ( $p' \ll p, \rho' \ll \rho$ ).

Подставляя (10), (11) в (4) и (5) и пренебрегая малыми величинами второго порядка относительно  $p', \rho'$  и скорости  $\mathbf{v}$ , получают линеаризованные уравнения для акустических параметров.

Уравнение непрерывности

$$\partial \rho' / \partial t + \rho_0 \operatorname{div}(\mathbf{v}) = 0. \quad (12)$$

Уравнение Эйлера

$$\partial \mathbf{v} / \partial t + \nabla p' / \rho_0 = 0. \quad (13)$$

Звуковая волна в идеальной жидкости есть адиабатическое движение. При этом давление  $p$  зависит только от одной термодинамической величины — от плотности  $\rho$  (баротропная среда):  $p = p(\rho)$ . Поэтому

$$p' = (\partial p / \partial \rho)_s \rho', \quad (14)$$

где  $s$  — энтропия.

Тогда из (12) получим

$$\partial p' / \partial t + \rho_0 (\partial p / \partial \rho)_s \operatorname{div}(\mathbf{v}) = 0. \quad (15)$$

Введем потенциал скорости  $\phi$

$$\mathbf{v} = \operatorname{grad} \phi. \quad (16)$$

Из (13) получим

$$p' = -\rho_0 \partial \varphi / \partial t, \quad (17)$$

а из (15)-(17) находим волновое уравнение для потенциала  $\varphi$

$$\partial^2 \varphi / \partial t^2 - c^2 \Delta \varphi = 0, \quad (18)$$

в котором  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $c$  – скорость звука,

$$c = \sqrt{(\partial p / \partial \rho)_s}. \quad (19)$$

В случае плоской волны, распространяющейся по оси  $x$ , уравнение (18) принимает вид:

$$\partial^2 \varphi / \partial t^2 - c^2 \partial^2 \varphi / \partial x^2 = 0. \quad (20)$$

Следует заметить, что условие применимости линеаризованных уравнений движения  $p' \ll p_0$ ,  $\rho' \ll \rho_0$  эквивалентно малости скорости движения частиц жидкости в волне по сравнению со скоростью звука:  $v \ll c$ , т.е. малости числа Маха ( $M = v/c \ll 1$ ).

Решение волнового уравнения (20) для бегущей плоской волны имеет общее решение

$$\varphi(x, t) = F_1(x - ct) + F_2(x + ct),$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – произвольные функции.

Рассматривая волну, распространяющуюся в положительном направлении оси  $x$ , для потенциала скорости  $\varphi(x, t)$  имеем

$$\varphi(x, t) = F_1(x - ct). \quad (21)$$

Из формул (21) и (16) видно, что в бегущей волне колебательная скорость имеет единственную компоненту  $v_x = v$ . Это означает, что частицы среды в волне колеблются вдоль направления ее распространения, т.е. звуковая волна является продольной. При этом колебательная скорость  $v$  связана с приращениями давления  $p'$  и плотности  $\rho'$  простыми алгебраическими соотношениями.

Используя формулы (8) и (9), из (13) получаем

$$V = \partial \varphi / \partial x = F(x - ct), \quad p' = -\rho_0 \partial \varphi / \partial t = \rho_0 c F(x - ct), \quad (22)$$

и, следовательно,

$$p' / v' = \rho_0 c. \quad (23)$$

Соотношение (23) иногда называют акустическим законом Ома, а величину  $\rho_0 c$  – волновым сопротивлением. Используя линеаризованное уравнение состояния, для возмущений плотности и колебательной скорости имеем

$$\rho' / \rho_0 = v / c. \quad (24)$$

Градиент акустического давления, как видно из формулы (5), коллинеарен вектору колебательной скорости и в силу продольного характера звуковой волны – направлению на источник звука.

Таким образом, используя приемники градиента звукового давления (установив их, например, в подвагонном пространстве), можно

определить направление прихода акустической волны, являющейся следствием взаимодействия колеса с ползуном и рельса, и тем самым регистрировать образование ползуна еще на начальном этапе его закатывания.

1. Інструкція з огляду, обстеження, ремонту та формування вагонних колісних пар: ЦВ-ЦЛ-0062. – Затв. «Укрзалізниця» 01.04.05 р. – вид. офіц. – К.: ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2006. – 102 с.

2. Образцов В.Л. Автоматизация технической диагностики колес при движении поезда / В.Л. Образцов, В.П. Малышев. – М.: Транспорт, 1978. – 48 с.

3. Кривошеев В.Н. Анализ неровностей на поверхностях катания колес, выявленных методом силового контроля // Исследование неровностей колес пассажирских вагонов: Сб. науч. тр. ВНИИЖТ. Вып.608. – М.: Транспорт, 1979. – С.60-74.

4. Кудрявцев Н.Н. Оценка эксплуатационной нагруженности колесных пар пассажирских вагонов инерционными силами и их нормирование / Н.Н. Кудрявцев, Б.В. Бакланов // Исследование неровностей колес пассажирских вагонов: Сб. науч. тр. ВНИИЖТ. Вып.608. – М.: Транспорт, 1979. – С.88-101.

5. Кудрявцев Н.Н. Влияние коротких неровностей колес и рельсов на динамические силы и ускорения ходовых частей вагонов / Н.Н. Кудрявцев, В.Н. Белоусов, В.М. Сасковец // Влияние неровностей поверхностей катания колес на работу ходовых частей пассажирских вагонов: Сб. науч. тр. ВНИИЖТ. Вып.610. – М.: Транспорт, 1981. – С.4-22.

6. Рычков С.П. MSC.visualNASTRAN для Windows. – М.: НТ Пресс, 2004. – 552 с.

7. Вериго М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.

Получено 15.03.2012

УДК 656.13

Ю.О.ДАВІДІЧ, д-р техн. наук,  
Д.П.ПОНКРАТОВ, Є.І.КУШ, кандидати техн. наук  
*Харківська національна академія міського господарства*  
М.В.КАЛЮЖНИЙ, канд. техн. наук  
*Донецька академія автомобільного транспорту*

## ОЦІНКА ТРИВАЛОСТІ ПРОСТОЮ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА ПРОМІЖНИХ ЗУПИНКАХ

На підставі результатів натурних обстежень визначено закономірності зміни тривалості простою транспортних засобів на проміжних зупинках автобусних маршрутів, що впливають на раціональну довжину перегону маршруту міського пасажирського транспорту.

На основании результатов натурных обследований определены закономерности изменения длительности простоя транспортных средств на промежуточных остановках автобусных маршрутов, которые влияют на рациональную длину перегона маршрута городского пассажирского транспорта.

On the basis of results of model inspections are definite to conformity to the law of change of duration of outage of transport vehicles on the intermediate stops of bus routes, which affect rational length of driving of route of public passenger transport.